

การพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งด้วย Raspberry Pi และ Node-RED Dashboard Development of a Low-Cost Smart Home Control System Based on Internet of Things Architecture Using Raspberry Pi and Node-RED Dashboard

อภิสิทธิ์ เชื้อนุ่น¹, อธิพิพัทธ์ สินธุ¹, และศิริวรรณ พลเศษ^{1,*}

Aphisit Chueanun¹, Itthiphat Sinthu¹ and Siriwan Polset^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

¹Mechatronics and Robotics Engineering Department, Faculty of Industrial Technology,
Valaya Alongkorn Rajabhat University Under Royal Patronage, Pathum Thani, 13180, Thailand

*Corresponding Author E-mail: siriwan@vru.ac.th

รับบทความ (Received) : May 09, 2026 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : June 18, 2026 /ตอบรับบทความ (Accepted) : June 26, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ Raspberry Pi 3 เป็นหน่วยควบคุมหลักร่วมกับ Node-RED Dashboard เพื่อควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า ตรวจสอบสภาพแวดล้อม และแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย DHT11 Sensor สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น OLED Display สำหรับแสดงผลข้อมูล LED จำนวน 4 ดวงสำหรับจำลองระบบแสงสว่าง DC Motor สำหรับจำลองพัดลม Servo Motor สำหรับจำลองการเปิด-ปิดประตู และ Maker Drive สำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ วิธีดำเนินการวิจัยเริ่มจากการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ การพัฒนา Node-RED Dashboard และโพลีควบคุม จากนั้นทดสอบการทำงานของระบบใน 3 ด้าน ได้แก่ การควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Dashboard การตรวจวัดและแสดงผลข้อมูล และการควบคุมพัดลมอัตโนมัติตามเงื่อนไขอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถควบคุม LED ทั้ง 4 ดวง และควบคุมประตูจำลองผ่าน Servo Motor ได้ตรงตามคำสั่ง สามารถอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้นจาก DHT11 Sensor และแสดงผลผ่าน Node-RED Dashboard และ OLED Display ได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ระบบสามารถสั่งให้พัดลมจำลองทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า Raspberry Pi 3 และ Node-RED Dashboard สามารถใช้พัฒนาระบบบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำได้อย่างเหมาะสมในระดับต้นแบบ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสื่อการเรียนรู้ด้าน IoT ระบบสมองกลฝังตัว และระบบควบคุมอัตโนมัติได้

คำสำคัญ : โมเดลต้นแบบบ้านอัจฉริยะ, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, Raspberry Pi, Node-RED Dashboard, ระบบควบคุมต้นทุนต่ำ

Abstract

This research aimed to design and develop a low-cost smart home control system prototype based on Internet of Things architecture using Raspberry Pi 3 as the main control unit and Node-RED Dashboard as the user interface. The system was designed to control household electrical devices, monitor environmental conditions, and display real-time data. The developed prototype consisted of a DHT11 sensor for temperature and humidity measurement, an OLED display for local data visualization, four LEDs for simulating lighting control, a DC motor for simulating a ventilation fan, a servo motor for simulating door opening and closing, and a Maker Drive module for motor control. The research methodology included system architecture design, hardware integration, Node-RED Dashboard development, and control flow implementation. The system was then evaluated in three aspects: device control through the dashboard, environmental data measurement and display, and automatic fan control based on temperature conditions. The experimental results showed that the system could accurately control all four LEDs and operate the simulated door through the servo motor according to user commands. The system was also able to read temperature and humidity values from the DHT11 sensor and continuously display the data through both the Node-RED Dashboard and OLED display. In addition, the simulated fan was activated when the temperature exceeded 30°C and stopped when the temperature decreased to 30°C or below. The findings indicate that Raspberry Pi 3 and Node-RED Dashboard can be effectively applied to develop a low-cost smart home control system at the prototype level. The proposed system is suitable for use as a learning platform for IoT, embedded systems, and basic automatic control applications.

Keywords: Smart home prototype model, Internet of Things, Raspberry Pi, Node-RED Dashboard, Low-cost control system

บทนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ Internet of Things (IoT) มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาระบบอัตโนมัติในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ในระบบบ้านอัจฉริยะ ซึ่งเป็นแนวทางการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซอร์โวมอเตอร์ และระบบสื่อสารเครือข่ายมาทำงานร่วมกัน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบ ควบคุม และจัดการอุปกรณ์ภายในบ้านได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ระบบบ้านอัจฉริยะที่พัฒนาบนพื้นฐานของ IoT จึงไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการเปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าจากระยะไกลเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการรับข้อมูลจากสภาพแวดล้อม การประมวลผลตามเงื่อนไข และการสั่งงานอุปกรณ์แบบอัตโนมัติ ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกสบาย ความปลอดภัย และการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมภายในที่อยู่อาศัย [1,2] (Cui et al., 2023; Kim, 2023)

ปัจจุบันระบบบ้านอัจฉริยะเชิงพาณิชย์จำนวนมากยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุน ความซับซ้อนของการติดตั้ง และการพึ่งพาแพลตฟอร์มเฉพาะของผู้ผลิต ส่งผลให้ผู้ใช้งานทั่วไปหรือผู้เรียนในสาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยีอาจเข้าถึงการพัฒนาและปรับแต่งระบบได้ไม่เต็มที่ แนวคิดการพัฒนาระบบบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญ เนื่องจากสามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับการเรียนรู้ การทดลอง และการต่อยอดเชิงวิศวกรรมได้ โดยเฉพาะการเลือกใช้บอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก เช่น Raspberry Pi ซึ่งมีความสามารถในการประมวลผล รองรับระบบปฏิบัติการ มีพอร์ต GPIO สำหรับเชื่อมต่อกับเซนเซอร์และอุปกรณ์ภายนอก อีกทั้งยังรองรับการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย ทำให้เหมาะสำหรับใช้เป็นหน่วยควบคุมกลางของระบบ IoT ภายใน

บ้าน [3] (Raspberry Pi Ltd., n.d.) เพื่อการต่อยอดการใช้ Raspberry Pi ร่วมกับ Node-RED Dashboard เป็นแนวทางที่เหมาะสมต่อการพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะ เนื่องจาก Node-RED เป็นเครื่องมือพัฒนาแบบ low-code ที่ออกแบบมาเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ บริการออนไลน์ และข้อมูลจากระบบต่าง ๆ ผ่านรูปแบบการสร้างโฟลว์การทำงาน ทำให้การออกแบบเงื่อนไขควบคุมและส่วนติดต่อผู้ใช้งานสามารถทำได้ง่ายและยืดหยุ่นมากขึ้น [4] (OpenJS Foundation, n.d.) นอกจากนี้ Node-RED Dashboard ยังช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมอุปกรณ์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้โดยไม่ต้องพัฒนาแอปพลิเคชันเฉพาะ จึงเหมาะสำหรับระบบต้นแบบที่ต้องการลดต้นทุน ลดความซับซ้อน และเปิดโอกาสให้สามารถปรับปรุงฟังก์ชันการทำงานได้ในอนาคต

จากแนวคิดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นแบบบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ Raspberry Pi เป็นหน่วยประมวลผลหลัก และใช้ Node-RED Dashboard เป็นส่วนติดต่อสำหรับควบคุมและแสดงผลระบบที่พัฒนาประกอบด้วย การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน เช่น หลอด LED พัดลมจำลอง และกลไกเปิด-ปิดประตู รวมถึงการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นด้วยเซนเซอร์ DHT11 และการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านจอ OLED แนวทางดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้ทั้งในรูปแบบการควบคุมโดยผู้ใช้งานและการควบคุมอัตโนมัติตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม เช่น การสั่งให้พัดลมทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าที่กำหนด

ดังนั้น การพัฒนาระบบนี้จึงมีความสำคัญทั้งในด้านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพในการจัดการอุปกรณ์ภายในบ้าน และในด้านการสร้างต้นแบบทางวิศวกรรมที่สามารถนำไปใช้เป็นการเรียนรู้หรือต่อยอดสู่ระบบอัตโนมัติที่ซับซ้อนมากขึ้นได้ในอนาคต เช่น การเพิ่มระบบแจ้งเตือนผ่านเครือข่าย การบันทึกข้อมูลสภาพแวดล้อมลงฐานข้อมูล การควบคุมผ่านระบบคลาวด์ หรือการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รักษาความปลอดภัยภายในบ้าน ทั้งนี้ ระบบที่พัฒนาขึ้นยังสะท้อนให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีต้นแบบเพื่อสนับสนุนการเรียนรู้ด้านวิศวกรรมไฟฟ้า เมคคาทรอนิกส์ ระบบสมองกลฝังตัว และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอย่างเป็นรูปธรรม

1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นแบบโดยใช้ Raspberry Pi ร่วมกับ Node-RED Dashboard
- 1.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านผ่านระบบ IoT
- 1.3 เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการตรวจวัดและควบคุมอุปกรณ์แบบอัตโนมัติตามสภาพแวดล้อมภายในบ้าน

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาระบบบ้านอัจฉริยะบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องเนื่องจากสามารถเชื่อมโยงอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เซนเซอร์ และระบบควบคุมให้ทำงานร่วมกันผ่านเครือข่ายได้ งานของ Stolojescu-Crisan, Crisan, and Butunoi (2021) [5] ได้นำเสนอระบบบ้านอัจฉริยะแบบ IoT ที่ใช้ Raspberry Pi เป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์สั่งงานภายในบ้าน โดยระบบสามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมอุณหภูมิ ไฟฟ้า ระบบรักษาความปลอดภัย และการติดตามพลังงานได้ แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มุ่งใช้ Raspberry Pi เป็นหน่วยควบคุมกลางของระบบบ้านอัจฉริยะต้นแบบ

ในด้านการออกแบบระบบให้ตอบสนองรวดเร็วและทำงานใกล้แหล่งข้อมูล งานของ Yar, Imran, Khan, Sajjad, and Kastrati (2021) [6] เสนอระบบบ้านอัจฉริยะที่ใช้แนวคิด edge computing ร่วมกับ IoT และ Raspberry Pi เพื่อลดการพึ่งพาระบบคลาวด์และเพิ่มความเร็วในการควบคุมอุปกรณ์ภายในบ้าน งานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Raspberry Pi สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ประมวลผลปลายทางที่เหมาะสมกับระบบควบคุมอัตโนมัติในบ้าน โดยมีผลทดสอบด้านเวลาตอบสนองของระบบควบคุม

หลอดไฟและรีเลย์ในระดับมิลลิวินาที ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญต่อการพัฒนาระบบควบคุมที่ต้องการความเสถียรและตอบสนองทันต่อการใช้งานจริง

นอกจากนี้ Thomas, MV, SL, and BS (2023) [7] ได้ศึกษาการใช้ IoT, Node-RED และเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบบ้านอัจฉริยะ โดยติดตั้ง Node-RED บน Raspberry Pi และสร้าง Dashboard เพื่อควบคุมอุปกรณ์ เช่น ไฟและพัดลม งานนี้แสดงให้เห็นจุดเด่นของ Node-RED ในการพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้งานและการกำหนดเงื่อนไขควบคุมระบบได้โดยไม่ต้องพัฒนาโปรแกรมที่ซับซ้อนมากนัก จึงสนับสนุนแนวทางของงานวิจัยนี้ที่เลือกใช้ Node-RED Dashboard เป็นเครื่องมือหลักสำหรับควบคุมและแสดงผลข้อมูลภายในระบบ

ด้านการประยุกต์ใช้ Node-RED ร่วมกับ MQTT และ Raspberry Pi ในระบบควบคุมสิ่งแวดล้อม Chen, Wu, Huang, Huang, and Yang (2024) [8] ได้นำเสนอระบบ IoT สำหรับติดตามสภาพแวดล้อมและควบคุมแสงสว่าง โดยใช้ Raspberry Pi 4B เป็นแพลตฟอร์ม Linux ผังตัว ทำหน้าที่เป็นทั้ง MQTT broker และ Node-RED server ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า Node-RED สามารถใช้สร้างเว็บ HMI สำหรับติดตามข้อมูลและควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวคิดนี้มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยตรง เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นต้องการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าและแสดงผลข้อมูลจากเซนเซอร์ผ่าน Dashboard เช่นเดียวกัน

งานของ Alam, Rokonzaman, Sarker, Abadin, Debnath, and Hossain (2024) [9] ได้ขยายขอบเขตระบบบ้านอัจฉริยะไปสู่การประมวลผลที่ปลายทาง โดยใช้ Raspberry Pi 3 เป็น Home Server ร่วมกับ MQTT, ฐานข้อมูล และระบบตรวจจับความผิดปกติ เช่น คิวน์ แก๊ส อุณหภูมิ และเปลวไฟ งานดังกล่าวเน้นให้เห็นว่าระบบบ้านอัจฉริยะไม่ควรจำกัดอยู่เพียงการควบคุมอุปกรณ์ แต่ควรมีความสามารถในการตรวจวัด เฝ้าระวัง และแจ้งเตือนตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมด้วย ประเด็นนี้สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่ใช้เซนเซอร์ DHT11 ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น เพื่อสั่งงานพัดลมแบบอัตโนมัติเมื่อค่าที่ตรวจวัดสูงกว่าค่าที่กำหนด

ในมิติของการจัดการพลังงานภายในบ้าน Bahmanyar, Razmjoo, and Mirjalili (2022) [10] ได้นำเสนอระบบ Home Energy Management System ที่ใช้ Raspberry Pi, Node-RED และ NodeMCU ร่วมกับอัลกอริทึมเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อจัดการการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า ลดค่าไฟฟ้า ลดภาระการใช้พลังงานช่วงพีค และเพิ่มความสะดวกของผู้ใช้ งานนี้สะท้อนให้เห็นว่า Node-RED สามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของสถาปัตยกรรมระบบจัดการพลังงานภายในบ้านได้ ไม่ใช่เพียงเครื่องมือควบคุมพื้นฐาน ดังนั้น ระบบต้นแบบในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาต่อยอดไปสู่การบันทึกข้อมูลพลังงานหรือการควบคุมอุปกรณ์ตามรูปแบบการใช้พลังงานได้ในอนาคต

La Tona, Luna, Di Piazza, and Di Piazza (2019) [11] ศึกษาการนำ Raspberry Pi ไปใช้กับระบบจัดการพลังงานในบ้านอัจฉริยะ โดยมุ่งสู่การใช้งานจริงของระบบควบคุมที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน งานดังกล่าวสนับสนุนแนวคิดว่าบอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กสามารถนำมาใช้เป็นหน่วยควบคุมสำหรับระบบบ้านอัจฉริยะได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะเมื่อระบบต้องการประมวลผลข้อมูลจากอุปกรณ์หลายชนิดและตอบสนองต่อเงื่อนไขการใช้งานภายในอาคาร

อีกแนวโน้มหนึ่งของงานบ้านอัจฉริยะคือการเพิ่มความปลอดภัยและการใช้งานที่สะดวกขึ้น Irugalbandara, Naseem, Perera, Kiruthikan, and Logeeshan (2023) [12] ได้นำเสนอระบบบ้านอัจฉริยะที่รองรับการสั่งงานด้วยเสียง การวัดกำลังไฟฟ้า และการทำงานแบบออฟไลน์ เพื่อลดการพึ่งพาบริการคลาวด์และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน งานนี้ชี้ให้เห็นว่าแนวทางการออกแบบบ้านอัจฉริยะควรคำนึงถึงความเสถียร ความปลอดภัย และความเหมาะสมกับบริบทของผู้ใช้ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ระบบอินเทอร์เน็ตอาจไม่เสถียร ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวคิดต่อยอดจากระบบควบคุมพื้นฐานในงานวิจัยนี้ได้

โดยสรุป งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นว่า Raspberry Pi เป็นแพลตฟอร์มที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นศูนย์กลางของระบบบ้านอัจฉริยะ เนื่องจากรองรับการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ อุปกรณ์สั่งงาน และซอฟต์แวร์ควบคุมได้หลากหลาย ขณะที่ Node-RED มีจุดเด่นด้านการสร้างโฟลว์ควบคุมและ Dashboard ที่ใช้งานง่าย งานวิจัยนี้จึงต่อยอดจากองค์ความรู้ดังกล่าว โดยมุ่งพัฒนา

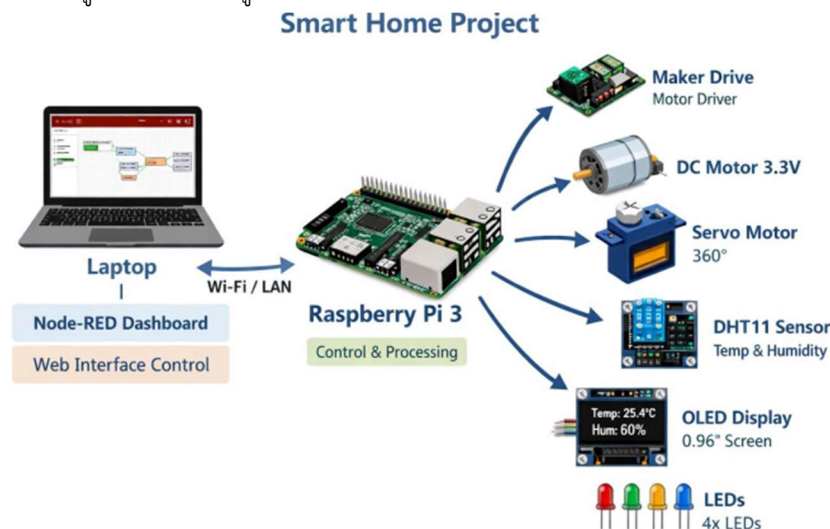
ระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำที่สามารถสั่งงานอุปกรณ์ไฟฟ้า ตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้น แสดงผลแบบเรียลไทม์ และควบคุมพัดลมอัตโนมัติตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมภายในบ้าน

วิธีดำเนินการวิจัย

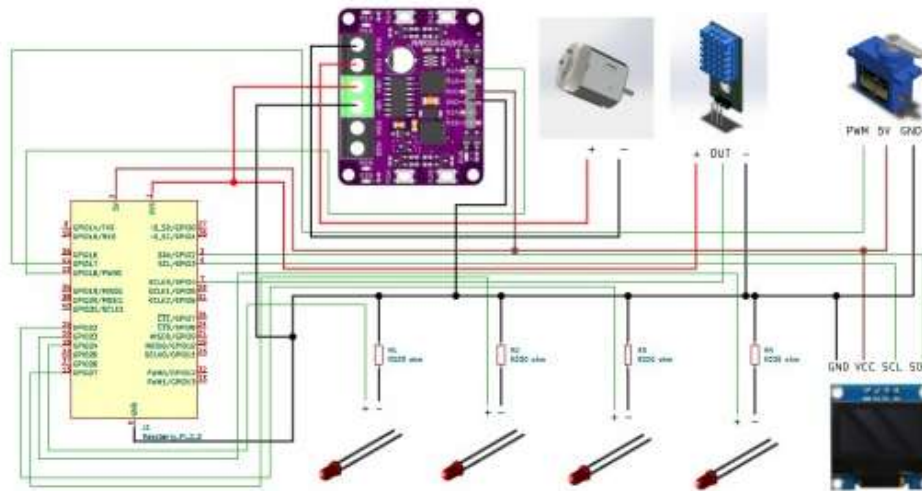
การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนา มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ Raspberry Pi 3 เป็นหน่วยควบคุมหลัก และใช้ Node-RED Dashboard เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ระบบที่พัฒนาขึ้นมุ่งเน้นการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน การตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้น การแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ และการควบคุมอุปกรณ์ตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม โดยอุปกรณ์หลักของระบบประกอบด้วย Raspberry Pi 3, Maker Drive, DC Motor 3.3V, Servo Motor 360°, DHT11 Sensor, OLED Display ขนาด 0.96 นิ้ว และ LED จำนวน 4 ดวง ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบของระบบต้นแบบในรายงานเดิม

1. การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ

การออกแบบระบบเริ่มจากการกำหนดสถาปัตยกรรมการทำงานของระบบบ้านอัจฉริยะ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนรับข้อมูลจากเซนเซอร์ ส่วนประมวลผลกลาง ส่วนควบคุมอุปกรณ์ และส่วนแสดงผลข้อมูล ผู้วิจัยกำหนดให้ Raspberry Pi 3 ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของระบบ เนื่องจากสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านพอร์ต GPIO และรองรับการสื่อสารผ่านเครือข่าย Wi-Fi/LAN ได้ ส่วน Node-RED Dashboard ใช้เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ เพื่อให้สามารถสั่งงานและตรวจสอบสถานะของระบบได้จากหน้าจอเดียว ส่วนด้านระบบฮาร์ดแวร์ประกอบด้วย DHT11 Sensor สำหรับตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้น OLED Display สำหรับแสดงผลข้อมูลภายในระบบ LED จำนวน 4 ดวงสำหรับจำลองระบบแสงสว่าง DC Motor สำหรับจำลองพัดลม และ Servo Motor สำหรับจำลองกลไกเปิด-ปิดประตู โดยมี Maker Drive ทำหน้าที่เป็นวงจรขับมอเตอร์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของการควบคุมและลดภาระกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่าน Raspberry Pi โดยตรง โครงสร้างการทำงานของระบบและการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสดงดังรูปภาพที่ 1 และรูปภาพที่ 2



รูปภาพที่ 1 แผนผังสถาปัตยกรรมระบบและการเชื่อมต่อวงจรของระบบบ้านอัจฉริยะ



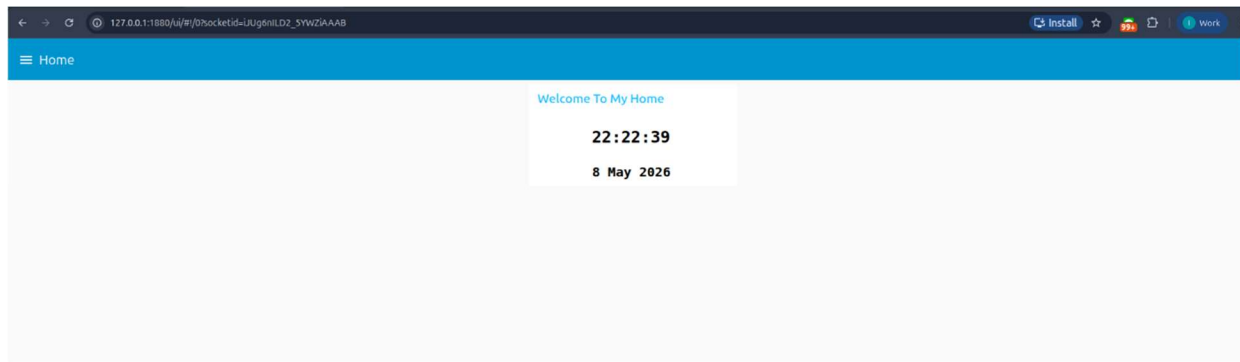
รูปภาพที่ 2 ผังวงจรการเชื่อมต่อวงจรของระบบบ้านอัจฉริยะ

2. การติดตั้งฮาร์ดแวร์และการเชื่อมต่ออุปกรณ์

การติดตั้งฮาร์ดแวร์ดำเนินการโดยเชื่อมต่ออุปกรณ์แต่ละชนิดเข้ากับ Raspberry Pi 3 ตามหน้าที่ของระบบ เริ่มจากการเชื่อมต่อ DHT11 Sensor เพื่อรับค่าอุณหภูมิและความชื้นเข้าสู่ระบบ จากนั้นเชื่อมต่อ OLED Display เพื่อใช้แสดงข้อมูลพื้นฐานของระบบ เช่น ค่าอุณหภูมิ ความชื้น หรือสถานะของอุปกรณ์ การแสดงผลผ่าน OLED ช่วยให้สามารถตรวจสอบข้อมูลได้โดยไม่ต้องเปิด Dashboard ตลอดเวลา ในส่วนของอุปกรณ์สั่งงาน LED จำนวน 4 ดวงถูกใช้จำลองระบบแสงสว่างภายในบ้าน โดยควบคุมผ่าน GPIO ที่กำหนดแยกกันแต่ละดวง DC Motor 3.3V ใช้จำลองพัดลมภายในบ้าน และเชื่อมต่อผ่าน Maker Drive เพื่อช่วยขับเคลื่อนให้เหมาะสมกับการทำงานของมอเตอร์ ลดภาระทางไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นกับ Raspberry Pi 3 โดยตรง ส่วน Servo Motor 360° ใช้จำลองกลไกเปิด-ปิดประตู โดยควบคุมผ่านสัญญาณ PWM จากนั้นภาคส่วนการเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ถูกออกแบบให้สามารถตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์แต่ละส่วนได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ เซนเซอร์ทำหน้าที่รับข้อมูลจากสภาพแวดล้อม Raspberry Pi 3 ทำหน้าที่ประมวลผลและตัดสินใจตามคำสั่งหรือเงื่อนไข และอุปกรณ์ปลายทางทำหน้าที่ตอบสนองต่อผลการประมวลผล การจัดวางโครงสร้างเช่นนี้ทำให้ระบบมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นต้นแบบด้าน IoT และสามารถปรับปรุงเพิ่มเติมได้ในอนาคต

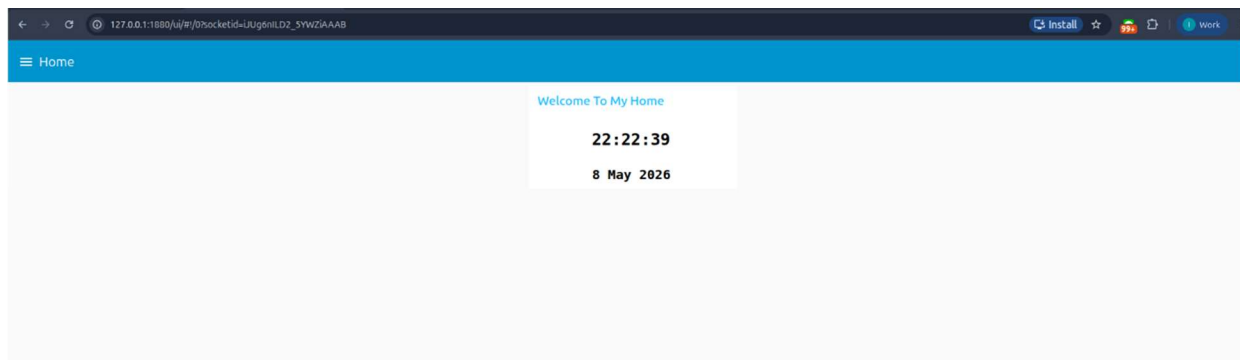
3. การพัฒนา Node-RED Dashboard และโฟลว์ควบคุมระบบ

หลังจากติดตั้งฮาร์ดแวร์แล้ว ได้พัฒนา Node-RED Dashboard เพื่อใช้เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งาน โดยออกแบบหน้าจอให้ใช้งานง่ายและสอดคล้องกับฟังก์ชันหลักของระบบ ได้แก่ การแสดงข้อมูลเบื้องต้น การควบคุมอุปกรณ์ และการติดตามสถานะของระบบ หน้าแรกของ Dashboard ถูกออกแบบให้แสดงข้อความต้อนรับ เวลา และวันที่ของระบบ เพื่อใช้เป็นหน้าจอเริ่มต้นก่อนเข้าสู่การควบคุมอุปกรณ์ ดังรูปภาพที่ 3



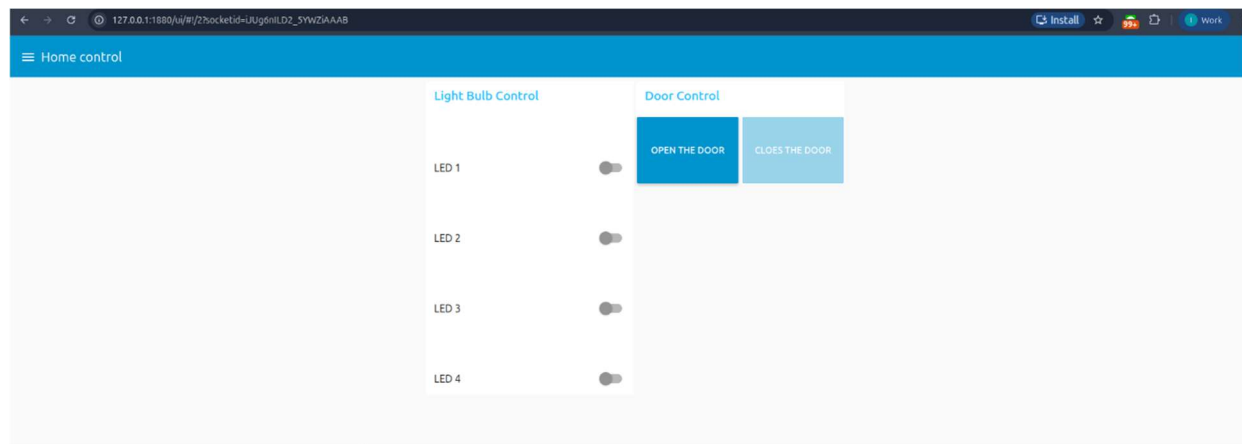
รูปภาพที่ 3 หน้าจอหลักของระบบบน Node-RED Dashboard

จากรูปภาพที่ 3 หน้าจอหลักทำหน้าที่แสดงสถานะความพร้อมของระบบ โดยแสดงข้อความ “Welcome To My Home” พร้อมเวลาและวันที่ปัจจุบัน ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานทราบว่าระบบ Dashboard สามารถทำงานและเชื่อมต่อกับ Node-RED ได้ตามปกติ ถัดมาได้พัฒนาหน้าจอควบคุมอุปกรณ์ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเปิด-ปิด LED จำนวน 4 ดวง และควบคุมประตูจำลอง ผ่านปุ่ม OPEN THE DOOR และ CLOSE THE DOOR เมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มหรือสวิตช์บน Dashboard คำสั่งจะถูกส่งไปยัง Raspberry Pi 3 เพื่อควบคุมอุปกรณ์ปลายทางผ่าน GPIO และ PWM ตามที่กำหนดไว้ หน้าจอควบคุมอุปกรณ์แสดงดังรูปภาพที่ 4



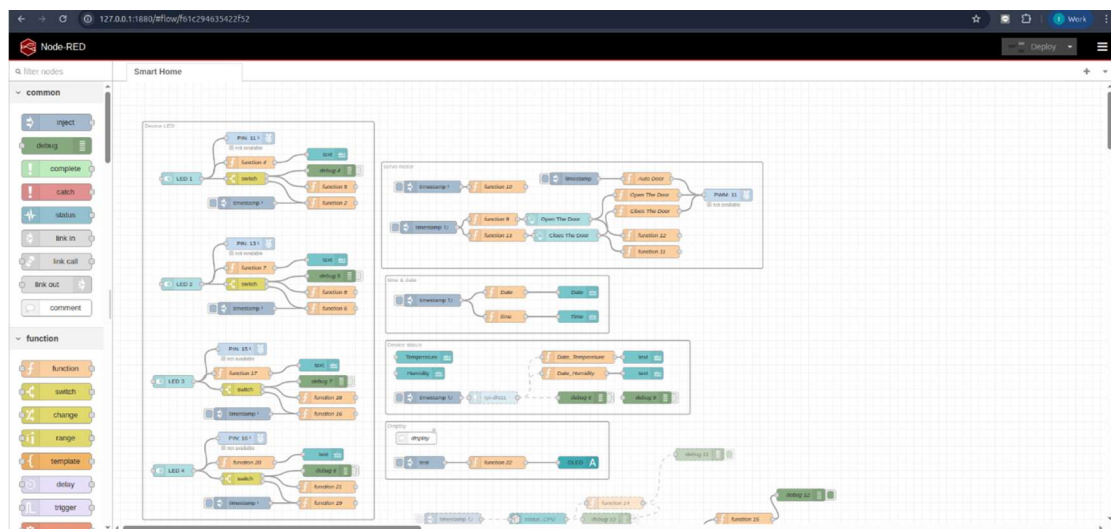
รูปภาพที่ 4 หน้าจอหลักของระบบบน Node-RED Dashboard

จากรูปภาพที่ 4 แสดงส่วนควบคุมหลอดไฟ LED 1-LED 4 และส่วนควบคุมประตูจำลอง ซึ่งออกแบบให้ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานได้โดยตรงผ่านเว็บเบราว์เซอร์ การออกแบบลักษณะนี้ช่วยให้การควบคุมอุปกรณ์ภายในบ้านทำได้สะดวก โดยไม่ต้องสั่งงานผ่านโค้ดหรือเข้าถึงวงจรถ่ายทอดโดยตรง นอกจากนี้ ยังได้พัฒนาหน้าจอแสดงสถานะของระบบ เพื่อใช้ติดตามข้อมูลระหว่างการทำงาน โดยแสดงค่าอุณหภูมิของ CPU ของ Raspberry Pi 3 และพื้นที่สำหรับแสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นจาก DHT11 Sensor หน้าจอดังกล่าวมีประโยชน์ต่อการตรวจสอบความพร้อมของระบบและใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินผลการดำเนินงาน ดังรูปภาพที่ 5



รูปภาพที่ 5 หน้าจอแสดงสถานะของระบบบน Node-RED Dashboard

จากรูปภาพที่ 5 ระบบสามารถแสดงสถานะของอุปกรณ์ประมวลผล โดยตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าอุณหภูมิ CPU ประมาณ 46 องศาเซลเซียส พร้อมตำแหน่งสำหรับแสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อม การมีหน้าจอติดตามสถานะช่วยให้ผู้วิจัยสามารถสังเกตการทำงานของระบบได้สะดวกขึ้นระหว่างการพัฒนาโปรแกรม และการพัฒนาโปรแกรมบน Node-RED ได้ออกแบบให้โปรแกรมแต่ละกลุ่มทำงานแยกตามหน้าที่ของระบบ ได้แก่ กลุ่มควบคุม LED กลุ่มควบคุม Servo Motor สำหรับประตูกำลึง กลุ่มแสดงเวลาและวันที่ กลุ่มรับค่าจาก DHT11 Sensor กลุ่มแสดงผลผ่าน OLED Display และกลุ่มตรวจสอบข้อมูลด้วย debug node โดยโปรแกรมควบคุม LED เชื่อมโยงกับ GPIO ที่กำหนดไว้ ได้แก่ PIN 11, PIN 13, PIN 15 และ PIN 16 ส่วนโปรแกรมควบคุมประตูกำลึงใช้สัญญาณ PWM เพื่อควบคุม Servo Motor โครงสร้างโปรแกรมการทำงานของระบบบ้านอัจฉริยะบน Node-RED Editor แสดงดังรูปภาพที่ 6



รูปภาพที่ 6 โปรแกรมการทำงานของระบบบ้านอัจฉริยะบน Node-RED Editor

จากรูปภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมการทำงานของระบบบ้านอัจฉริยะถูกจัดกลุ่มตามหน้าที่ของระบบอย่างชัดเจน โดยแต่ละกลุ่มมีการเชื่อมโยงระหว่างโหนดรับคำสั่ง โหนดประมวลผล และโหนดส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ปลายทาง การจัดโครงสร้างโปรแกรมในลักษณะ

นี้ช่วยให้การตรวจสอบข้อผิดพลาดทำได้ง่าย ลดความซับซ้อนในการพัฒนา และรองรับการเพิ่มฟังก์ชันเพิ่มเติมในอนาคต เช่น การแจ้งเตือนผ่านเครือข่าย การบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล หรือการควบคุมผ่านระบบคลาวด์

4. การทดสอบและการประเมินผลระบบ

การทดสอบระบบดำเนินการหลังจากติดตั้งฮาร์ดแวร์และพัฒนาโพล์ควบคุมเสร็จสมบูรณ์ โดยกำหนดแนวทางการทดสอบให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3 ด้าน ได้แก่ การทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ การทดสอบการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูล และการทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม ดังนี้ (1) การทดสอบด้านแรกเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard โดยให้ผู้ใช้งานสั่งเปิด-ปิด LED ทั้ง 4 ดวง และสั่งเปิด-ปิดประตูจำลองผ่านปุ่มบน Dashboard จากนั้นตรวจสอบว่า LED และ Servo Motor ตอบสนองตรงตามคำสั่งหรือไม่ เกณฑ์การประเมินพิจารณาจากความถูกต้องของสถานะอุปกรณ์หลังได้รับคำสั่ง เช่น LED ติดหรือดับตรงตามสวิตช์ และ Servo Motor หมุนสอดคล้องกับคำสั่งเปิดหรือปิดประตู (2) การทดสอบด้านที่สองเป็นการตรวจสอบการรับค่าและการแสดงผลข้อมูลจาก DHT11 Sensor โดยระบบต้องสามารถอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้น ส่งข้อมูลไปยัง Node-RED Dashboard และแสดงผลผ่าน OLED Display ได้อย่างต่อเนื่อง เกณฑ์การประเมินพิจารณาจากความต่อเนื่องของการรับส่งข้อมูล ความสอดคล้องของค่าที่แสดงผล และความสามารถในการแสดงข้อมูลแบบเรียลไทม์ (3) การทดสอบด้านที่สามเป็นการตรวจสอบการควบคุมพัดลมจำลองแบบอัตโนมัติ โดยกำหนดเงื่อนไขให้ DC Motor ทำงานเมื่อค่าอุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุดทำงานเมื่อค่าอุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส การทดสอบนี้ใช้เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมภายในบ้าน และตรวจสอบความถูกต้องของตรรกะควบคุมที่พัฒนาขึ้น

การประเมินผลโดยรวมพิจารณาจาก 4 ตัวชี้วัด ได้แก่ ความถูกต้องของการควบคุมอุปกรณ์ ความต่อเนื่องของการแสดงผลข้อมูล ความถูกต้องของการทำงานตามเงื่อนไขอัตโนมัติ และความเสถียรของระบบเมื่อใช้งานผ่านเครือข่าย Wi-Fi/LAN ข้อมูลจากการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์เชิงพรรณนา โดยเปรียบเทียบคำสั่งที่กำหนดบน Dashboard กับการตอบสนองของอุปกรณ์จริง รวมถึงเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้กับสถานะการทำงานของพัดลมจำลอง หากระบบสามารถควบคุมอุปกรณ์แสดงผลข้อมูล และทำงานตามเงื่อนไขได้อย่างถูกต้อง จะถือว่าต้นแบบระบบบ้านอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และมีศักยภาพสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบการเรียนรู้และการพัฒนาระบบ IoT ต้นทุนต่ำต่อไป

ผลการวิจัย

การนำเสนอผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย ได้แก่ ผลการพัฒนาด้านแบบระบบ ผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard ผลการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูล และผลการทดสอบการควบคุมอัตโนมัติตามเงื่อนไขอุณหภูมิ โดยระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย Raspberry Pi 3 เป็นหน่วยควบคุมหลัก เชื่อมต่อกับ Node-RED Dashboard, DHT11 Sensor, OLED Display, LED จำนวน 4 ดวง, DC Motor, Servo Motor และ Maker Drive ตามโครงสร้างของระบบบ้านอัจฉริยะที่ออกแบบไว้

1. ผลการพัฒนาด้านแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะ

ผลการพัฒนาระบบพบว่า ต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะสามารถทำงานได้ตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ โดย Raspberry Pi 3 ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรับคำสั่งจาก Node-RED Dashboard และส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ปลายทางผ่านพอร์ต GPIO และสัญญาณ PWM ระบบสามารถรองรับการควบคุมหลอด LED จำนวน 4 ดวง การควบคุมประตูจำลองด้วย Servo Motor การตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นด้วย DHT11 Sensor และการแสดงผลข้อมูลผ่าน Dashboard และ OLED

Display ได้ครบตามฟังก์ชันที่กำหนดดังแสดงตารางที่ 1 นอกจากนี้ Node-RED Dashboard ที่พัฒนาขึ้นสามารถแบ่งหน้าจอการใช้งานออกเป็นหน้า Home, Home Control และ Home Status ได้อย่างเป็นระบบ โดยหน้า Home ใช้แสดงข้อความต้อนรับเวลา และวันที่ หน้า Home Control ใช้ควบคุม LED และประตูจำลอง ส่วนหน้า Home Status ใช้ติดตามสถานะของระบบ เช่น อุณหภูมิ CPU อุณหภูมิ และความชื้น การออกแบบดังกล่าวช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงฟังก์ชันของระบบได้ง่ายผ่านเว็บเบราว์เซอร์ภายในเครือข่ายเดียวกัน

ตารางที่ 1 ผลการพัฒนาฟังก์ชันหลักของระบบต้นแบบ

ลำดับ	ฟังก์ชันของระบบ	อุปกรณ์/ซอฟต์แวร์ที่ใช้	ผลการพัฒนา	สถานะ
1	หน่วยควบคุมกลาง	Raspberry Pi 3	สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับข้อมูลและอุปกรณ์สั่งงานได้	ผ่าน
2	ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน	Node-RED Dashboard	สามารถสร้างหน้า Home, Home Control และ Home Status ได้	ผ่าน
3	การควบคุมแสงสว่าง	LED 1-LED 4	สามารถควบคุมการเปิด-ปิดผ่าน Dashboard ได้	ผ่าน
4	การควบคุมประตูจำลอง	Servo Motor 360°	สามารถสั่งเปิด-ปิดผ่านปุ่มบน Dashboard ได้	ผ่าน
5	การตรวจวัดสภาพแวดล้อม	DHT11 Sensor	สามารถอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้นเข้าสู่ระบบได้	ผ่าน
6	การแสดงผลข้อมูล	OLED Display และ Dashboard	สามารถแสดงข้อมูลสถานะของระบบได้	ผ่าน

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบสามารถพัฒนาฟังก์ชันหลักได้ครบตามขอบเขตที่กำหนด โดยเฉพาะการเชื่อมโยงระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ผ่าน Node-RED ซึ่งเป็นจุดสำคัญของระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุ่นต่ำ

2. ผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard

การทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard ดำเนินการโดยสั่งงานอุปกรณ์จากหน้า Home Control ได้แก่ การเปิด-ปิด LED จำนวน 4 ดวง และการควบคุมประตูจำลองผ่านปุ่ม OPEN THE DOOR และ CLOSE THE DOOR ผลการทดสอบพบว่า เมื่อผู้ใช้งานกดสวิทช์หรือปุ่มคำสั่งบน Dashboard ระบบสามารถส่งคำสั่งไปยัง Raspberry Pi 3 และควบคุมอุปกรณ์ปลายทางได้ตรงตามสถานะที่กำหนด สำหรับ LED แต่ละดวง ระบบสามารถแยกการควบคุมได้อย่างอิสระ ทำให้สามารถเปิด-ปิด LED แต่ละตำแหน่งได้โดยไม่กระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อื่น ส่วนการควบคุมประตูจำลองพบว่า Servo Motor สามารถตอบสนองต่อคำสั่งเปิดและปิดประตูได้ตามลำดับดังแสดงตารางที่ 2 การทำงานดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า Dashboard สามารถทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานสำหรับควบคุมอุปกรณ์ภายในบ้านได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard

ลำดับ	รายการทดสอบ	คำสั่งที่กำหนดบน Dashboard	ผลตอบสนองของอุปกรณ์	ผลการประเมิน
1	LED 1	เปิด/ปิดผ่านสวิตช์ LED 1	LED 1 เปลี่ยนสถานะตามคำสั่ง	ผ่าน
2	LED 2	เปิด/ปิดผ่านสวิตช์ LED 2	LED 2 เปลี่ยนสถานะตามคำสั่ง	ผ่าน
3	LED 3	เปิด/ปิดผ่านสวิตช์ LED 3	LED 3 เปลี่ยนสถานะตามคำสั่ง	ผ่าน
4	LED 4	เปิด/ปิดผ่านสวิตช์ LED 4	LED 4 เปลี่ยนสถานะตามคำสั่ง	ผ่าน
5	ประตูจำลอง	กดปุ่ม OPEN THE DOOR	Servo Motor หมุนเพื่อจำลองการเปิดประตู	ผ่าน
6	ประตูจำลอง	กดปุ่ม CLOSE THE DOOR	Servo Motor หมุนเพื่อจำลองการปิดประตู	ผ่าน

จากตารางที่ 2 พบว่าระบบสามารถควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Dashboard ได้ครบทุกฟังก์ชันที่ออกแบบไว้ แสดงให้เห็นว่า Raspberry Pi 3 และ Node-RED Dashboard สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างสอดคล้อง ทั้งในส่วนของการรับคำสั่งจากผู้ใช้งาน และการส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ปลายทาง

3. ผลการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลของระบบ

ผลการทดสอบการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลพบว่า ระบบสามารถรับค่าจาก DHT11 Sensor เพื่อใช้ติดตามอุณหภูมิและความชื้นภายในสภาพแวดล้อมจำลองได้ โดยค่าที่ตรวจวัดถูกส่งเข้าสู่ Raspberry Pi 3 และนำไปแสดงผลผ่าน Node-RED Dashboard และ OLED Display การแสดงผลบน Dashboard ช่วยให้ผู้ใช้งานตรวจสอบข้อมูลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้สะดวก ขณะที่ OLED Display ช่วยให้สามารถตรวจสอบค่าพื้นฐานของระบบได้โดยตรงจากอุปกรณ์ต้นแบบ นอกจากนี้ หน้าจอ Home Status ยังสามารถแสดงค่าอุณหภูมิ CPU ของ Raspberry Pi 3 ได้ โดยตัวอย่างหน้าจอที่ได้จากการทดสอบแสดงค่าอุณหภูมิ CPU ประมาณ 46 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยสามารถติดตามสถานะการทำงานของอุปกรณ์ประมวลผลระหว่างการทดลองได้ดังแสดงตารางที่ 3 การมีทั้ง Dashboard และ OLED Display จึงช่วยเพิ่มความชัดเจนในการตรวจสอบข้อมูล และลดข้อจำกัดของการพึ่งพาหน้าจอควบคุมเพียงช่องทางเดียว

ตารางที่ 3 ผลการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลของระบบ

รายการทดสอบ	แหล่งข้อมูล/อุปกรณ์	ช่องทางแสดงผล	ผลที่ได้จากการทดสอบ	ผลการประเมิน
อุณหภูมิภายในสภาพแวดล้อมจำลอง	DHT11 Sensor	Node-RED Dashboard	ระบบสามารถรับค่าและแสดงผลได้	ผ่าน
ความชื้นภายในสภาพแวดล้อมจำลอง	DHT11 Sensor	Node-RED Dashboard	ระบบสามารถรับค่าและแสดงผลได้	ผ่าน
อุณหภูมิและความชื้น	DHT11 Sensor	OLED Display	แสดงข้อมูลจากเซนเซอร์บนอุปกรณ์ต้นแบบได้	ผ่าน
อุณหภูมิ CPU	Raspberry Pi 3	Home Status Dashboard	แสดงค่าอุณหภูมิ CPU ของระบบได้	ผ่าน
เวลาและวันที่	Node-RED Flow	Home Dashboard	แสดงเวลาและวันที่ปัจจุบันได้	ผ่าน

4. ผลการทดสอบการควบคุมอัตโนมัติตามเงื่อนไขอุณหภูมิ

การทดสอบการควบคุมอัตโนมัติดำเนินการโดยใช้ค่าอุณหภูมิจาก DHT11 Sensor เป็นเงื่อนไขในการสั่งงาน DC Motor ผ่าน Maker Drive เพื่อจำลองการทำงานของพัดลมภายในบ้าน ระบบถูกกำหนดให้พัดลมทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ตามตรรกะการควบคุมที่ออกแบบไว้ในระบบต้นแบบ ผลการทดสอบพบว่า เมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 28 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าเงื่อนไขที่กำหนด พัดลมจำลองไม่ทำงาน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 31 องศาเซลเซียส ระบบสามารถสั่งให้ DC Motor ทำงานได้ และเมื่ออุณหภูมิลดลงกลับมาที่ 30 องศาเซลเซียส ระบบสั่งให้พัดลมหยุดทำงานได้ตามเงื่อนไขที่ตั้งแสดงตารางที่ 4 การทำงานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองต่อค่าตรวจวัดจากสภาพแวดล้อมและสั่งงานอุปกรณ์โดยอัตโนมัติได้

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการควบคุมพัดลมจำลองตามเงื่อนไขอุณหภูมิ

กรณีทดสอบ	ค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้	เงื่อนไขที่กำหนด	ผลการทำงานของพัดลมจำลอง	ผลการประเมิน
กรณีที่ 1	28 °C	ต่ำกว่า 30 °C	พัดลมหยุดทำงาน	ผ่าน
กรณีที่ 2	31 °C	สูงกว่า 30 °C	พัดลมทำงาน	ผ่าน
กรณีที่ 3	30 °C	เท่ากับ 30 °C	พัดลมหยุดทำงาน	ผ่าน
กรณีที่ 4	ค่าที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม	ประมวลผลตามเงื่อนไขที่กำหนด	ระบบตอบสนองตามสถานะอุณหภูมิ	ผ่าน

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมพัดลมจำลองได้ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยการใช้ DHT11 Sensor ร่วมกับ Raspberry Pi 3 และ Maker Drive ทำให้ระบบสามารถทำงานในลักษณะอัตโนมัติได้ ไม่จำเป็นต้องอาศัยการสั่งงานจากผู้ใช้งานตลอดเวลา ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ต้องการประเมินความสามารถของระบบในการตรวจวัดและควบคุมอุปกรณ์ตามสภาพแวดล้อมภายในบ้าน

โดยสรุป ผลการวิจัยทั้ง 4 ส่วนแสดงให้เห็นว่า ต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ครบตามวัตถุประสงค์ ได้แก่ การพัฒนาระบบต้นแบบด้วย Raspberry Pi 3 และ Node-RED Dashboard การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านระบบ IoT การตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ และการควบคุมอุปกรณ์อัตโนมัติตามค่าอุณหภูมิ ระบบจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นต้นแบบการเรียนรู้ด้าน IoT ระบบสมองกลฝังตัว และการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมต้นทุนต่ำในบริบทของบ้านอัจฉริยะต่อไป

อภิปรายผล

จากผลการพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งด้วย Raspberry Pi และ Node-RED Dashboard สามารถอภิปรายผลให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ วิธีดำเนินการวิจัย และผลการทดลองได้ดังนี้

1. การพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำ

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า Raspberry Pi 3 สามารถทำหน้าที่เป็นหน่วยควบคุมกลางของระบบบ้านอัจฉริยะได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากสามารถรับข้อมูลจากเซนเซอร์ ประมวลผลเงื่อนไข และส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ปลายทางผ่านพอร์ต GPIO ได้ในระบบเดียว องค์ประกอบที่ใช้ ได้แก่ DHT11 Sensor, OLED Display, LED, DC Motor, Servo Motor และ Maker Drive สามารถเชื่อมโยงการทำงานร่วมกันได้ตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 ที่มุ่งออกแบบและ

พัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำโดยใช้ Raspberry Pi ร่วมกับ Node-RED Dashboard และเมื่อพิจารณาในเชิงวิศวกรรม ระบบที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นคือการจัดโครงสร้างอุปกรณ์อย่างเป็นระบบ โดยแยกหน้าที่ของแต่ละส่วนอย่างชัดเจน ได้แก่ ส่วนรับข้อมูล ส่วนประมวลผล ส่วนควบคุมอุปกรณ์ และส่วนแสดงผลข้อมูล การออกแบบเช่นนี้ช่วยให้ระบบสามารถตรวจสอบการทำงานของแต่ละส่วนได้ง่าย ลดความซับซ้อนของการพัฒนา และเหมาะต่อการต่อยอดในอนาคต เช่น การเพิ่มระบบแจ้งเตือน การบันทึกข้อมูล หรือการเชื่อมต่อกับบริการคลาวด์ อย่างไรก็ตาม ระบบยังอยู่ในระดับต้นแบบ จึงเหมาะกับการทดลองและการเรียนรู้มากกว่าการใช้งานจริงในระดับบ้านพักอาศัยเต็มรูปแบบ เนื่องจากยังไม่ได้ประเมินความทนทานของระบบในระยะยาว ความปลอดภัยทางไฟฟ้า และความมั่นคงปลอดภัยของเครือข่ายอย่างละเอียด

2. การควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard

ผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard พบว่าระบบสามารถควบคุม LED จำนวน 4 ดวง และควบคุมประตูลงด้วย Servo Motor ได้ตรงตามคำสั่งของผู้ใช้งาน แสดงให้เห็นว่า Node-RED Dashboard สามารถทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานที่เหมาะสมสำหรับระบบบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำ โดยผู้ใช้งานสามารถสั่งงานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้โดยไม่ต้องเข้าถึงโค้ดหรือวงจรฮาร์ดแวร์โดยตรง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 ที่ต้องการทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านผ่านระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ประเด็นที่น่าสนใจคือ การออกแบบ Dashboard ให้แยกหน้าใช้งานออกเป็น Home, Home Control และ Home Status ช่วยให้ระบบมีความชัดเจนต่อผู้ใช้งาน หน้า Home ใช้แสดงความพร้อมของระบบ หน้า Home Control ใช้ควบคุมอุปกรณ์โดยตรง และหน้า Home Status ใช้ติดตามสถานะของระบบ การจัดรูปแบบเช่นนี้ทำให้ต้นแบบมีความใกล้เคียงกับระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะเชิงประยุกต์มากกว่าการสั่งงานผ่านโปรแกรมหรือคำสั่งพื้นฐานเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม การควบคุมยังจำกัดอยู่ภายในเครือข่าย Wi-Fi/LAN เดียวกัน หากต้องการนำไปใช้งานจริงควรพัฒนาให้รองรับการเข้าถึงจากภายนอกอย่างปลอดภัย เช่น การกำหนดสิทธิ์ผู้ใช้งาน การเข้ารหัสข้อมูล และการเชื่อมต่อผ่านระบบคลาวด์ที่มีมาตรการรักษาความปลอดภัย

3. การตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์

ผลการทดลองด้านการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลพบว่า ระบบสามารถรับค่าอุณหภูมิและความชื้นจาก DHT11 Sensor และนำข้อมูลไปแสดงผลผ่าน Node-RED Dashboard และ OLED Display ได้ตามที่ออกแบบไว้ การแสดงผลผ่านสองช่องทางช่วยเพิ่มความสะดวกในการติดตามสถานะของระบบ โดย Dashboard เหมาะสำหรับการตรวจสอบผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ส่วน OLED Display เหมาะสำหรับการตรวจสอบข้อมูลโดยตรงที่ตัวอุปกรณ์ต้นแบบ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับวิธีดำเนินการวิจัยที่กำหนดให้ระบบมีทั้งส่วนแสดงผลผ่านซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ จากนั้นในเชิงการใช้งาน ระบบดังกล่าวสะท้อนแนวคิดของ IoT ที่ไม่ได้มุ่งเน้นเฉพาะการควบคุมอุปกรณ์เท่านั้น แต่ยังรวมถึงการรับรู้ข้อมูลจากสภาพแวดล้อมและนำข้อมูลนั้นมาใช้ประกอบการตัดสินใจของระบบ อย่างไรก็ตาม เซนเซอร์ DHT11 มีข้อจำกัดด้านความละเอียดและความแม่นยำเมื่อเทียบกับเซนเซอร์ที่มีคุณภาพสูงกว่า ดังนั้น หากต้องการเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลในงานวิจัยระยะต่อไป ควรเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับเครื่องมือมาตรฐาน หรือเปลี่ยนไปใช้เซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงขึ้น เช่น DHT22, SHT31 หรือ BME280 เพื่อเพิ่มความถูกต้องของผลการตรวจวัด

4. การควบคุมอัตโนมัติตามเงื่อนไขอุณหภูมิ

ผลการทดสอบการควบคุมพัดลมจำลองตามเงื่อนไขอุณหภูมิพบว่า ระบบสามารถสั่งให้ DC Motor ทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียสได้ตามตรรกะที่กำหนด ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 3 ซึ่งต้องการประเมินความสามารถของระบบในการตรวจวัดและควบคุมอุปกรณ์แบบอัตโนมัติตาม

สภาพแวดล้อมภายในบ้าน ซึ่งการควบคุมในลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้มากกว่าการควบคุมแบบผู้ใช้งานสั่งงานโดยตรง เนื่องจากระบบสามารถใช้ค่าจากเซนเซอร์เป็นเงื่อนไขในการตัดสินใจและสั่งงานอุปกรณ์ได้เอง แนวทางดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญของระบบบ้านอัจฉริยะ เนื่องจากช่วยลดภาระของผู้ใช้งาน เพิ่มความสะดวก และอาจช่วยสนับสนุนการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม โดยให้พัดลมทำงานเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าที่กำหนด อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขการควบคุมที่ใช้ในการทดลองยังเป็นรูปแบบพื้นฐานแบบค่าขีดแบ่งเดียว จึงอาจเกิดการเปิด-ปิดถี่หากค่าอุณหภูมิแกว่งอยู่บริเวณใกล้ 30 องศาเซลเซียส ในการพัฒนาต่อควรเพิ่มช่วงฮิสเทอรีซิส เช่น เปิดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 31 องศาเซลเซียส และปิดเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส เพื่อให้ระบบทำงานเสถียรมากขึ้น

5. ความสอดคล้องของผลการวิจัยกับแนวทางการพัฒนาระบบ IoT ต้นทุนต่ำ

เมื่อพิจารณาผลการวิจัยโดยรวม พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองแนวคิดของระบบ IoT ต้นทุนต่ำได้ในระดับต้นแบบ เนื่องจากใช้ฮาร์ดแวร์ที่หาได้ง่าย มีต้นทุนไม่สูง และใช้ซอฟต์แวร์แบบเปิดที่สามารถปรับแต่งได้ตามความต้องการ Node-RED ช่วยลดความซับซ้อนของการพัฒนาโปรแกรม ทำให้ผู้พัฒนาสามารถสร้างระบบที่เชื่อมโยงระหว่าง Dashboard, เซนเซอร์ และอุปกรณ์ปลายทางได้โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมทั้งหมดจากศูนย์ ดังนั้นจึงได้ผลการวิจัยยังสะท้อนให้เห็นว่าการใช้ Raspberry Pi 3 ร่วมกับ Node-RED Dashboard เหมาะสำหรับการพัฒนาต้นแบบด้านวิศวกรรมไฟฟ้า เมคคาทรอนิกส์ ระบบสมองกลฝังตัว และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เนื่องจากระบบมีองค์ประกอบครบทั้งการรับข้อมูล การประมวลผล การควบคุมอุปกรณ์ และการแสดงผลข้อมูล อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้งานจริงควรพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม ได้แก่ ความเสถียรของเครือข่ายความปลอดภัยของระบบควบคุม การป้องกันความเสียหายจากกระแสไฟฟ้าเกิน และการทดสอบการทำงานต่อเนื่องในระยะยาว

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ Raspberry Pi 3 เป็นหน่วยควบคุมหลักร่วมกับ Node-RED Dashboard สำหรับการควบคุมและแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ DHT11 Sensor สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น OLED Display สำหรับแสดงผลข้อมูล LED จำนวน 4 ดวงสำหรับจำลองระบบแสงสว่าง DC Motor สำหรับจำลองพัดลม Servo Motor สำหรับจำลองการเปิด-ปิดประตู และ Maker Drive สำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์

ผลการพัฒนาระบบพบว่า ต้นแบบสามารถทำงานได้ครบตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ โดย Raspberry Pi 3 สามารถทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรับข้อมูลจากเซนเซอร์ ประมวลผลคำสั่ง และส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ปลายทางได้อย่างเป็นระบบ ขณะที่ Node-RED Dashboard สามารถออกแบบเป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานได้ 3 ส่วน ได้แก่ หน้า Home สำหรับแสดงข้อความต้อนรับ เวลา และวันที่ หน้า Home Control สำหรับควบคุม LED และประตูจำลอง และหน้า Home Status สำหรับแสดงสถานะของระบบ เช่น อุณหภูมิ CPU อุณหภูมิ และความชื้น การจัดโครงสร้างดังกล่าวช่วยให้ระบบมีความชัดเจน ใช้งานง่าย และเหมาะสมต่อการพัฒนาต้นแบบระบบ IoT ต้นทุนต่ำ และผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard พบว่า ระบบสามารถสั่งเปิด-ปิด LED ทั้ง 4 ดวง และควบคุมการเปิด-ปิดประตูจำลองผ่าน Servo Motor ได้ตรงตามคำสั่งของผู้ใช้งาน แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมโยงระหว่าง Dashboard, Raspberry Pi 3 และอุปกรณ์ปลายทางสามารถทำงานร่วมกันได้ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย นอกจากนี้ ระบบยังสามารถรับค่าอุณหภูมิและความชื้นจาก DHT11 Sensor แล้วแสดงผลผ่าน Node-RED Dashboard และ OLED Display ได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะของระบบและข้อมูลสภาพแวดล้อมได้แบบเรียลไทม์ ในส่วนของการควบคุมอัตโนมัติ ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถใช้ค่าอุณหภูมิจาก DHT11 Sensor เป็นเงื่อนไขในการสั่งงาน DC Motor ผ่าน Maker Drive ได้ โดยพัดลมจำลองทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุด

ทำงานเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการควบคุมแบบผู้ใช้งานสั่งงานโดยตรง แต่สามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมและควบคุมอุปกรณ์แบบอัตโนมัติได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

โดยสรุป ต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ครบทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำ การทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านผ่านระบบ IoT และการประเมินความสามารถของระบบในการตรวจวัดและควบคุมอุปกรณ์อัตโนมัติตามสภาพแวดล้อม ระบบดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นต้นแบบการเรียนรู้ด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ระบบสมองกลฝังตัว และระบบควบคุมอัตโนมัติในระดับพื้นฐาน อีกทั้งยังสามารถนำไปต่อยอดสู่การพัฒนาบ้านอัจฉริยะที่มีฟังก์ชันซับซ้อนมากขึ้นในอนาคต ดังนั้นระบบยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ความแม่นยำของเซนเซอร์ DHT11 ซึ่งเหมาะสำหรับการทดลองระดับต้นแบบมากกว่าการตรวจวัดที่ต้องการความละเอียดสูง การควบคุมพัดลมยังใช้เงื่อนไขแบบค่าขีดแบ่งเดียว ซึ่งอาจทำให้เกิดการเปิด-ปิดถี่เมื่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงใกล้ค่าที่กำหนด และการใช้งาน Dashboard ยังจำกัดอยู่ภายในเครือข่ายเดียวกัน ดังนั้น การพัฒนาต่อไปควรเพิ่มระบบบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล ระบบแจ้งเตือนผ่านอุปกรณ์พกพา การควบคุมผ่านระบบคลาวด์ การกำหนดสิทธิ์ผู้ใช้งาน และการใช้เซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงขึ้น เพื่อเพิ่มความเสถียร ความปลอดภัย และความพร้อมของระบบต่อการประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถนำผลการวิจัยไปใช้เป็นต้นแบบสำหรับการเรียนรู้และพัฒนาระบบบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำในด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ระบบสมองกลฝังตัว และระบบควบคุมอัตโนมัติได้ เนื่องจากผลการทดลองพบว่า Raspberry Pi 3 สามารถเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ อุปกรณ์แสดงผล และอุปกรณ์สั่งงานได้อย่างเป็นระบบ ขณะที่ Node-RED Dashboard สามารถใช้เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานสำหรับควบคุม LED ประตูลง และแสดงสถานะของระบบได้อย่างสะดวก ดังนั้น การนำผลการวิจัยไปใช้ควรเน้นการประยุกต์เป็นชุดฝึกปฏิบัติหรือระบบต้นแบบ โดยควรเพิ่มการจัดระเบียบวงจร แหล่งจ่ายไฟ และอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าให้เหมาะสม หากต้องการต่อยอดไปใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าจริง เพื่อให้ระบบมีความปลอดภัย เสถียร และเกิดประโยชน์สูงสุดต่อการเรียนรู้และการใช้งานเชิงประยุกต์

การวิจัยในครั้งต่อไปควรพัฒนาระบบให้มีความสมบูรณ์มากขึ้นในด้านการบันทึกข้อมูล การแจ้งเตือน และการควบคุมจากระยะไกล เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ยังเน้นการควบคุมและแสดงผลแบบเรียลไทม์ภายในเครือข่าย Wi-Fi/LAN เป็นหลัก แต่ยังไม่ได้พัฒนาระบบฐานข้อมูล การแจ้งเตือนผ่านอุปกรณ์พกพา หรือมาตรการความปลอดภัยสำหรับการเข้าถึงจากภายนอก นอกจากนี้ ควรปรับปรุงการควบคุมพัดลมจากเงื่อนไขอุณหภูมิแบบค่าขีดแบ่งเดียวให้มีความเสถียรมากขึ้น เช่น การเพิ่มช่วงฮิสเทรีซิส และควรเปรียบเทียบเซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงกว่า DHT11 เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล รวมถึงทดสอบระบบในระยะยาวเพื่อประเมินความเสถียรและความพร้อมต่อการใช้งานจริงในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cui, J., Du, Z., Liu, K., & Cao, J. (2023). The simulation design of smart home system based on Internet of Things. *Journal of Cyber Security and Mobility*, 23(6). <https://doi.org/10.3233/JCM-226995>
- [2] Kim, H. (2023). Machine learning-based cost-effective smart home data analysis and forecasting for energy saving. *Buildings*, 13(9), 2397. <https://doi.org/10.3390/buildings13092397>
- [3] Raspberry Pi Ltd. (n.d.). Raspberry Pi 3 Model B. Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [4] OpenJS Foundation. (n.d.). Node-RED: Low-code programming for event-driven applications. Node-RED. <https://www.node-red.dev/>

- [5] Stolojescu-Crisan, C., Crisan, C., & Butunoi, B.-P. (2021). An IoT-based smart home automation system. *Sensors*, 21(11), 3784. <https://doi.org/10.3390/s21113784>
- [6] Yar, H., Imran, A. S., Khan, Z. A., Sajjad, M., & Kastrati, Z. (2021). Towards smart home automation using IoT-enabled edge-computing paradigm. *Sensors*, 21(14), 4932. <https://doi.org/10.3390/s21144932>
- [7] Thomas, L., MV, M. K., SL, S. D., & BS, P. (2023). Towards comprehensive home automation: Leveraging the IoT, Node-RED, and wireless sensor networks for enhanced control and connectivity. *Engineering Proceedings*, 59(1), 173. <https://doi.org/10.3390/engproc2023059173>
- [8] Chen, C.-Y., Wu, S.-H., Huang, B.-W., Huang, C.-H., & Yang, C.-F. (2024). Web-based Internet of Things on environmental and lighting control and monitoring system using Node-RED, MQTT and Modbus communications within embedded Linux platform. *Internet of Things*, 27, 101305. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101305>
- [9] lam, T., Rokonzaman, M., Sarker, S., Abadin, A. F. M. Z., Debnath, T., & Hossain, M. I. (2024). Internet of Things-based home automation with network mapper and MQTT protocol. *Computers and Electrical Engineering*, 120, 109807. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109807>
- [10] Bahmanyar, D., Razmjoo, N., & Mirjalili, S. (2022). Multi-objective scheduling of IoT-enabled smart homes for energy management based on Arithmetic Optimization Algorithm: A Node-RED and NodeMCU module-based technique. *Knowledge-Based Systems*, 247, 108762. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108762>
- [11] La Tona, G., Luna, M., Di Piazza, A., & Di Piazza, M. C. (2019). Towards the real-world deployment of a smart home EMS: A DP implementation on the Raspberry Pi. *Applied Sciences*, 9(10), 2120. <https://doi.org/10.3390/app9102120>
- [12] Irugalbandara, C., Naseem, A. S., Perera, S., Kiruthikan, S., & Logeeshan, V. (2023). A secure and smart home automation system with speech recognition and power measurement capabilities. *Sensors*, 23(13), 5784. <https://doi.org/10.3390/s23135784>